

手動制御系における人間オペレータの動特性に関する研究

著者	吉澤 誠
号	905
発行年	1982
URL	http://hdl.handle.net/10097/9641

氏 名	吉 澤 誠
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 58 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	手動制御系における人間オペレータの動特性に関する 研究
指 導 教 官	東北大学教授 竹田 宏
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 竹田 宏 東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 木村 正行 東北大学教授 畑中 浩 東北大学助教授 阿部 健一

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

人間の動作特性やその限界を十分考慮した機械の合理的設計, あるいは人間の持つ学習や適応などの優れた随意運動機能を解明するために, 手動制御系における人間オペレータの数学的モデルに関する研究が主に制御工学的立場からなされてきた。

従来の研究では, 主として比較的低い周波数領域における人間オペレータのふるまいをかなりうまく表現できるモデルが提案されている。ところが, ランダム・ステップ信号のような高周波成分をかなり多く含む信号を目標入力とする際の手動制御系の開ループ・ゲイン特性は, 比較的高い周波数において顕著なピークを作る。この現象は従来までの伝達関数モデル等では非常に説明しにくいものである。

本論文は, 上述の現象の持つ本質的な役割を解明し, 人間オペレータの制御機構を表わすとともに, 被験者として健常者ばかりでなく, 運動機能に障害を持つ疾患患者を用いることにより, そのモデルの妥当性を検討したものである。

本論文では, まず問題のゲイン特性のピークが人間固有のむだ時間を補償しようとするための積極的な予測動作を反映するものであることを, 有限極配置法の立場から明らかにする。また, ステップ状目標入力に対する人間オペレータの過渡応答を表現するための状態方程式モデルを提案する。

さらに、中枢神経系に障害があり運動機能に異常のある被験者の制御特性を健常者のそれと比較することにより、中枢神経系の障外が本来の正常な予測制御動作を失わせることを確認する。

第2章 手動制御系の構成と実験および解析方法

実験に用いた系は補償型手動制御系であり、ブラウン管上の輝線の偏位として表示された目標入力と出力との間の偏差をできるだけ小さくするように、人間オペレータはポテンショメータのハンドルを操作するという試行を行なう。制御対象は伝達関数 $G_p(s)$ を持つ種々の線形要素である。目標入力は大きく分けて時間連続な不規則信号と時間不連続な不規則信号の2種類を用いた。実験から得られる時系列データをフーリエ変換することにより系の周波数特性等を求めた。

第3章 人間オペレータの制御特性

人間オペレータは、目標入力の特性の変化に応じて適応的に自らの動特性を変化させる。従来よく用いられてきた時間連続な不規則信号（正規性白色雑音によって励振されたシェイピング・フィルタの出力あるいは多数の正弦波の重畳信号など）を目標入力とする場合の開ループ周波数特性は、ゲインが -20 dB/decade の割合で減衰するという性質を持つ伝達関数モデルで十分表現することができる。ところが、ランダム・ステップ信号などのような時間不連続な目標入力に対する開ループ・ゲイン特性はゲイン交差周波数の約6倍の周波数において顕著なピークを作り、従来のモデルは適用できない（図1）。

この開ループ・ゲイン特性のピークの発生原因として、1)人間オペレータのサンプル値制御動作に関連するもの、2)神経-筋肉系の動特性に関連するもの、および3)人間の持つむだ時間を補償するための予測制御動作に関連するもの、の主に3つが考えられる。本章では、3)の原因をとる解釈が最も妥当であることを詳細に論じた。

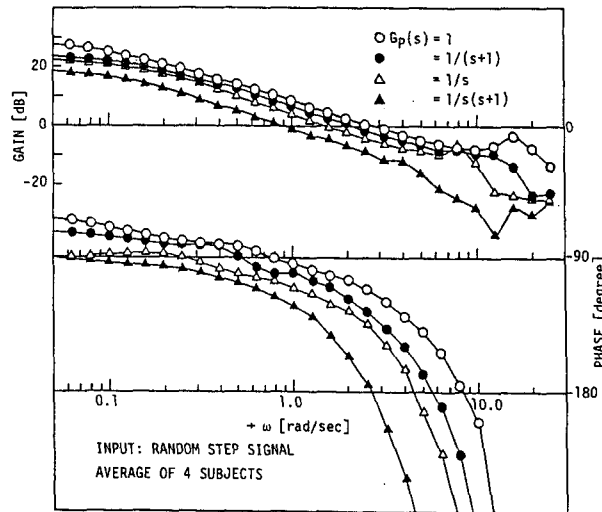


図1 ランダム・ステップ入力に対する補償型手動制御系の開ループ周波数特性

第4章 人間オペレータのむだ時間補償機構

人間の持つむだ時間以外に人為的なむだ時間を開ループ中に含ませるために、制御対象をむだ時間要素とした場合の結果が図2である。この図は、制御対象のむだ時間を大きくすると問題のピークが強調されることを表わしており、このピークが実際にむだ時間に関係するものであることを示

している。図3は、むだ時間に対する予測制御法の一つである有限極配置法を、ある積分系に適用した場合の開ループ周波数特性の理論値を示すものであり、図1あるいは図2と同様、ゲイン交差周波数の約6倍毎の周波数におけるゲインにピークが存在し、またむだ時間が大きくなるとピークが強調されることがわかる。

このような事実に基づき、ステップ状入力に対する人間オペレータの過渡応答を表現するための状態方程式モデルを、有限極配置法を用いて導いた。このモデルは、目標入力発生系の固有値を持つ動的補償器、状態推定のためのオブザーバおよびむだ時間を補償するための予測器などから成り立つ。シミュレーションにより、従来の伝達関数モデルに比べてこのモデルが人間の応答に近い応答をすることが明らかとなった(図4)。

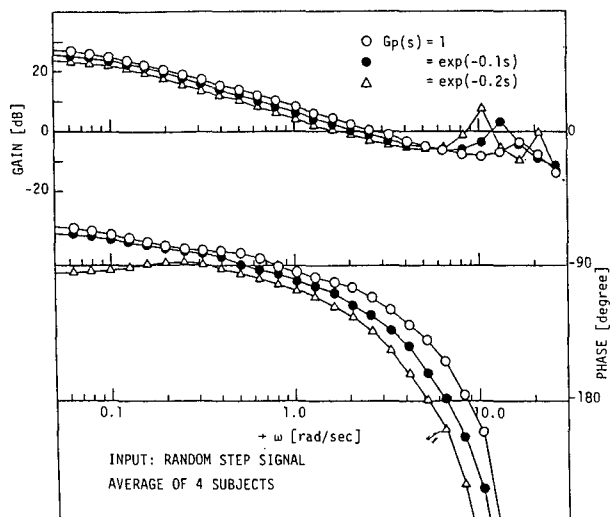


図2 制御対象がむだ時間であるときの開ループ周波数特性

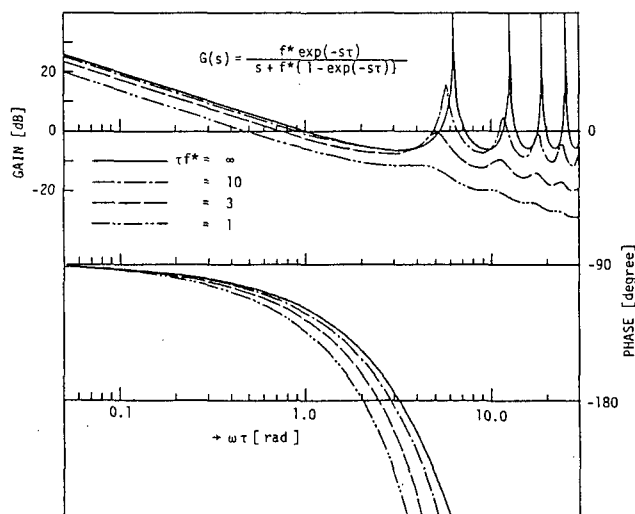


図3 有限極配置法によるフィードバック則を適用された系の開ループ周波数伝達関数

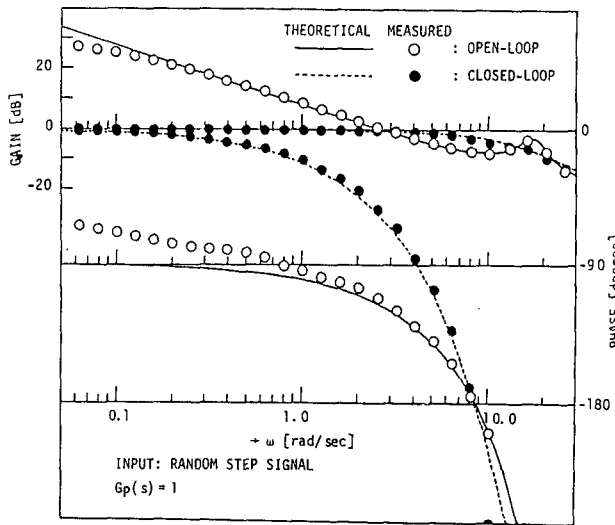


図4 周波数領域におけるモデルと実測値（1名の被験者の3試行の平均値）との比較

第5章 運動調節系の異常と制御特性

前章で提案した状態方程式モデルは、その構造上、外界および自己の運動系の動特性を表わすモデルを含む形になっている。特に、予測器にはプロセス・モデルと呼ばれる一種の内部モデルが必要となる。そこで、小脳はその中に外界等に対する内部モデルを形成するような働きをするという伊藤の唱えた生理学上の仮説と、前章で提案した状態方程式モデルの機能的構造との関連性を確かめるために、むだ時間を制御対象とする手動制御作業を小脳に疾患を持つ患者に行なわせた。その結果、健常者に比べて小脳疾患患者の動作は非線形性が強く、かつむだ時間補償動作の特徴である開ループ・ゲインのピークがかなり小さいことがわかった。また、主成分分析による特徴抽出法等を用いて大脳基底核に障害を持つ疾患であるパーキンソン病患者の制御特性と比較すると、小脳失調症患者の示す帯域幅は比較的広く、手が健常者並みにすばやく動かせるにもかかわらず、非線形性の度合いはパーキンソン病と同程度かそれより強いことが明らかとなった。これらの結果は、小脳が巧妙で誤動作の少ない運動制御、特に予測制御を行なうために重要な役割を果たしていることを示唆するものである。

第6章 結 言

この章では、本論文の総括を行ない、残された課題について述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

人間の制御性や能力限界を考慮した機械の合理的設計，あるいは人間のもつ優れた学習，適応機能などの解明には，手動制御系における人間オペレータの動特性を表わす数学的モデルが必要不可欠であり，従来より多くのモデルが提案されてきた。著者は，従来ほとんど注目されなかった比較的高い周波数領域における人間オペレータの制御特性が，系の応答に無視できない影響をもつことに着目し，有限極配置法の立場から人間の動特性を記述する状態方程式モデルを導いた。また神経系疾患者の動特性を表わすパラメータに，主成分分析を適用して各疾患の特徴を抽出し，疾患の計算機診断を可能にした。本論文はそれらの成果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では，本研究で用いた補償形手動制御系の構成と実験方法およびデータ解析法について述べている。

第3章では，ランダムステップ信号のような時間不連続な入力に対し，ゲイン交差周波数より高い周波数領域で制御系の開ループゲインに顕著なピークが現われることを示し，この現象が，応答改善のために積極的役割を果していることを初めて指摘している。

第4章では，前記の現象が，人間のもつ個有のむだ時間を補償する機構に起因するものであることを明らかにして，有限極配置法を用いて人間の予測制御動作を表わす状態方程式モデルを導いている。また，ディジタルシミュレーションにより，そのモデルの周波数特性が実験結果とよく一致することを立証している。これは本研究の重要な成果である。

第5章では，前章までの結果を神経系疾患の定量的診断に応用することを目的として，小脳失調症などの神経系疾患者を被験者として用い，それらの解析結果に主成分分析を適用して各疾患の特徴を抽出している。本診断法は，臨床医学の面からも極めて興味深いものである。

第6章は結言である。

以上要するに，本論文は有限極配置法を用いて手動制御系における人間オペレータの動特性を表わす状態方程式モデルを導き，実験によりその妥当性を立証するとともに，その成果を神経系疾患の計算機診断に応用したもので，制御工学，生体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。